



Vélez Blanco, en Andalousie, est un village agricole, où se pratique depuis mille ans un système de partage de l'eau introduit par les Maures. Les terrasses cultivées (1) reçoivent de l'eau par l'intermédiaire d'un vieux réseau de canaux,

qui aboutit aujourd'hui dans un réservoir moderne (2). La colline Muela (3) est à l'origine des sources qui alimentent ce réseau, mais leurs étiages baissent depuis que les forages se multiplient dans la région.

historiques donnent un aperçu de l'organisation de la gestion de ces réservoirs. Contrairement aux cascades de réservoirs des zones rurales, créées et gérées par la population paysanne, les grands bassins étaient gérés par l'administration royale, donc de façon centralisée. Puisqu'ils ne s'asséchaient généralement pas, même si les saisons des pluies du printemps et de l'automne apportaient peu d'eau, ils atténuaient les effets d'un déficit saisonnier en eau.

Aujourd'hui, environ 30 000 bassins sont en usage au Sri Lanka dans une région dont la taille est comparable à celle de l'Occitanie. On investit toujours afin de réaliser de nouveaux réservoirs, de sorte que les réseaux de bassins constituent l'une des composantes importantes du paysage et de la culture de ce pays.

MILLE ANS DE GESTION CONSENSUELLE D'UNE «VEGA»

En Europe aussi existent des terroirs où l'on continue à utiliser les techniques d'irrigation de l'Antiquité ou du Moyen Âge. L'un d'eux est Vélez Blanco, en Andalousie, dans le sud-est de la péninsule Ibérique. Des Romains d'abord, puis des Goths, des Maures et enfin des Espagnols y ont vécu. Le village et son paysage attendant de jardins (des *vegas*) offrent aux chercheurs une occasion unique d'étudier comment un système d'irrigation a pu à la fois fonctionner pendant des siècles tout en s'adaptant aux conditions sociales et techniques changeantes.

La *vega* de Vélez Blanco est une zone de champs en terrasses dont l'irrigation est gérée en commun par leurs propriétaires, tous des habitants de la commune. Plus de 100 kilomètres de canaux reliés à plusieurs

sources souterraines distribuent gratuitement de l'eau dans les champs d'après une rotation complexe et proportionnelle à la surface à irriguer. L'eau provient de sources qui surgissent au pied du mont Maimón, et c'est leur permanence qui explique la fondation du village. Outre cet approvisionnement de base, les agriculteurs disposent aussi de la possibilité d'acheter un volume d'eau supplémentaire aux enchères. C'est surtout au printemps, pour les semailles, ou pendant les mois d'été chauds et secs que la demande augmente et que les prix montent. Le produit des ventes aux enchères de l'eau sert à l'entretien et à la rénovation du réseau de canaux, ce qui rend le système pratiquement autonome.

D'origine mauresque, cette façon de gérer l'eau est pratiquée à Vélez Blanco depuis plus de mille ans. Toutefois, comme en beaucoup d'endroits en Espagne, ce système traditionnel pourrait s'effondrer. Une première raison est liée à l'exode rural : depuis le xx^e siècle, Vélez Blanco a perdu 75 % de sa population. Ce sont surtout les jeunes qui partent... Ensuite, la multiplication dans le sud de l'Espagne de forages équipés de pompes électriques, la plupart illégaux, fait baisser la nappe phréatique et assèche les sources.

Ces problèmes espagnols sont à l'image de ceux du monde : l'eau, surtout dans les régions arides, est une ressource rare, comme l'est aussi la prudence dans sa gestion ! Les quatre exemples que nous avons présentés prouvent que dans le passé, les populations humaines ont été capables de se procurer de l'eau même dans des conditions difficiles. Leur exemple devrait nous aider à mieux utiliser cette ressource précieuse et de plus en plus rare. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Berking et al., **Heavy rainfalls in a desert(ed) city : A climate-archaeological case study from Sudan**, dans L. Giosan et al., *Climates, Landscapes, and Civilizations*, American Geophysical Union, pp. 163-168, 2013.

D. L. O. Mendis, **Environment and conflict : A kuhnian paradigm-based approach to understanding some socio-cultural and economic causes of problems and conflicts in modern irrigation projects in Southern Sri Lanka**, dans *Water for People and Nature*, Ministry of Irrigation and Water Management (dir.), Sri Lanka Water Heritage, pp. 95-122, 2003.

L'ESSENTIEL

> Les mollusques construisent des coquilles de formes complexes avec une précision mathématique.

> La modélisation mathématique montre qu'il suffit de suivre trois règles simples pour reproduire ces formes.

> Ces résultats aident à comprendre pourquoi de nombreuses espèces de mollusques non apparentées sécrètent des coquilles aux formes similaires.

LES AUTEURS



DEREK E. MOULTON
professeur de biomathématiques à l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne



ALAIN GORIELY
professeur de modélisation mathématique à l'université d'Oxford



RÉGIS CHIRAT
paléontologue et maître de conférences à l'université Claude-Bernard, à Lyon

Comment les coquillages acquièrent leur forme

Spirales, épines, surfaces côtelées... : les coquilles des mollusques ont des géométries complexes et d'une étonnante régularité. Comment ces formes sont-elles produites ? La modélisation mathématique montre que quelques processus mécaniques simples suffisent à engendrer les caractères observés.



Vue aux rayons X d'un peigne
de Vénus (*Murex pecten*),
gastéropode marin de la famille
des Muricidés.

Les mollusques sont de fantas-tiques architectes. Ils se construisent des structures solides qui protègent leur corps mou des prédateurs et des éléments: les coquilles, qui sont d'une robustesse, d'une durabilité et d'une beauté hors du commun. Beaucoup de ces coquillages présentent des formes complexes et spectaculaires, des spirales logarithmiques garnies d'épines bien ordonnées ou d'autres ornements, d'une régularité mathématique presque parfaite. Les mollusques n'ont pourtant aucune notion en mathématiques, évidemment. Les chercheurs se sont donc demandé comment ces humbles créatures produisent des motifs aussi complexes avec une telle précision.

Depuis plus d'un siècle, les scientifiques savent que les cellules, les tissus et les organes doivent obéir aux mêmes forces physiques que le reste de la matière. Mais pendant une bonne partie du xx^e siècle, les biologistes se sont attachés à comprendre comment le code génétique régit la formation de motifs biologiques et à déterminer comment ces motifs fonctionnent. Au cours des dernières décennies, cependant, les chercheurs se sont mis à appliquer la modélisation mathématique, appuyée sur la physique, pour tenter de comprendre comment apparaissent les formes du vivant. Dans cette optique, nos propres travaux ont livré ces dernières années des indices passionnants sur la façon dont les coquillages acquièrent des structures si remarquables.

En utilisant les outils de la géométrie différentielle, la partie des mathématiques qui étudie les courbes et les surfaces, nous avons déterminé que les formes complexes des coquillages découlent de quelques règles simples que suivent les mollusques lorsqu'ils bâtissent leur demeure. Ces règles interagissent avec les forces mécaniques produites au cours de la croissance du coquillage et engendrent une grande diversité de motifs. Nos découvertes contribuent à expliquer comment des caractéristiques singulières telles que les épines sont apparues de façon indépendante dans tant de lignées de gastéropodes (le groupe de mollusques le plus diversifié). Ces organismes n'ont nul besoin de subir les mêmes modifications génétiques pour acquérir le même type d'ornements, car les lois de la physique font l'essentiel du travail.

C'est au manteau du mollusque qu'il incombe de construire la coquille. Cet organe fin et mou sécrète couche après couche une substance riche en carbonate de calcium au niveau de l'ouverture du coquillage. Il lui suffit de suivre trois règles élémentaires pour former la spirale caractéristique des coquilles d'escargots, par exemple, et de nombreuses autres espèces de mollusques.

La première règle est l'*expansion*: en déposant uniformément davantage de matériau qu'à

l'incrément de croissance précédent, le mollusque crée une ouverture un peu plus large à chaque itération. Ce processus engendre un cône à partir d'un cercle initial. La deuxième règle est la *rotation*: en déposant légèrement plus de matériau d'un côté de l'ouverture, le mollusque finit par opérer une rotation complète de cette ouverture, ce qui construit un tore (la forme d'une chambre à air de pneu) à partir d'un cercle initial. La troisième règle est la *torsion*: le mollusque fait tourner les points où a lieu le dépôt. Si l'on n'effectue que les opérations *expansion* et *rotation*, on obtient un coquillage planispiralé comme celui des nautilus. Ajoutez la torsion, et le résultat est ce qu'on appelle une coquille hélicospirale comme celle des escargots.

Pour certains bâtisseurs de coquille, c'est la fin de l'histoire, une demeure toute en élégance et en simplicité. Pour d'autres, quelques fioritures sont de mise. Pour comprendre comment se forment des ornements tels que les épines, il nous faut examiner les forces produites au cours de la croissance du coquillage.

Le processus de sécrétion du coquillage repose sur un système mécanique intéressant. Le manteau est attaché à la coquille par ce qu'on



L'application de trois règles élémentaires suffit pour reproduire les spirales observées



nomme la zone générative, une région de matériau sécrété mais pas encore calcifié. C'est dans cette interaction entre le manteau et la coquille que réside le potentiel de formation de motifs. Tout décalage entre le manteau et l'ouverture de la coquille va imposer une contrainte mécanique au tissu du manteau. Si le manteau est trop petit pour l'ouverture, il devra s'étirer pour y rester attaché. Si le manteau est trop grand, il devra se comprimer. Et si la zone générative se déforme à cause de ces contraintes, le nouveau matériau sécrété par le manteau à ce stade adoptera la déformation du contour et se solidifiera, ce qui exercera une influence accrue sur le manteau à l'incrément de croissance suivant.

Pour résumer, si la coquille ne croît pas exactement au même rythme que le manteau >